

Н. С. РУДАШЕВСКИЙ, В. Н. РУДАШЕВСКИЙ (ООО «ЦНТ Инструментс»),
А. В. АНТОНОВ (ВСЕГЕИ)

Универсальная минералогическая технология исследования пород, руд и технологических продуктов

Технология объединяет взаимодополняющие методы электроимпульсной дезинтеграции (ЭИД) и новый способ гидросепарации (ГС) для гравитационного разделения измельченных материалов. ЭИД+ГС дает универсальное решение для минералогических исследований коренных пород, руд и технологических продуктов. Детальные минерало-геохимические исследования исходной пробы и различных размерных фракций «тяжелых» ГС-концентратов являются составляющими 3D-минералогической технологии. Рассмотрены примеры результатов ЭИД+ГС решения геологических, минералогических, генетических и прикладных задач для различных типов пород и руд ряда классических месторождений мира и России: Pt-Au-Pd руды месторождения Платиновый Риф, Скаергаардский массив, Гренландия, Дания; Ag-Au-Pd-Pt руды Бушвельдского комплекса (хромититы UG2, LG6, M1/2, Риф Меренского), ЮАР; Ag-Au-Pt-Pd минерализация карбонатитов Ковдорского массива, Кольский п-ов; Ag-Au-Pt-Pd минерализация карбонатитов месторождения Люлекоп, Палаборский массив, ЮАР; 8 новых минералов элементов платиновой группы; Au-руды Березовского месторождения, Урал; Au-Ag-руды месторождения Веладеро, Аргентина; алмазоносная лампроитовая диатрема, Карелия; микрообъекты для U-Pb и Re-Os изотопии.

Ключевые слова: *минералогическая технология, благородные металлы, электроимпульсная дезинтеграция, гидросепарация, кимберлиты, лампроиты, геохронология, новые минералы платиновой группы.*

N. S. RUDASHEVSKY, V. N. RUDASHEVSKY (CNT Instruments, LLC),
A. V. ANTONOV (VSEGEI)

The universal technology of mineralogical investigations of bedrocks, ores and processed products

The described technology combines two complementary methods – electric pulse disintegration (EPD) and our patented hydroseparation (HS). Such combined EPD&HS technology is used as unique solution for mineralogical research of bedrocks, ores and processed products. The detailed mineralogical and geochemical investigations of the primary sample and heavy mineral HS-concentrates of different size fractions are parts of a single 3D-technology of mineralogical research. Some examples of combined EPD&HS technology application in geology, mineralogy, applied mineralogy and mineral processing for several rocks and ores are briefly described: Pt-Au-Pd ores of the Platinova Reef deposit of Skaergaard massif, Greenland, Denmark; Ag-Au-Pd-Pt ores of the Bushveld Complex (chromitites of UG2, LG6, M1/2, Merensky Reef), South Africa; Ag-Au-Pt-Pd mineralization of carbonatites from Kovdor Massif, Kola Peninsula; Ag-Au-Pt-Pd mineralization of carbonatites from Loolekop deposit, Phalaborwa Massif, South Africa; 8 new platinum group minerals; Au-ores of the Berezovsky deposit, the Urals; Au-Ag-ores from the Veladero deposit, Argentina; diamondiferous lamproite diatreme, Karelia; microobjects for U-Pb and Re-Os isotopic investigations.

Keywords: *mineralogical research technology, precious metals, electric pulse disintegration, hydroseparation, kimberlites, lamproites, geochronology, new platinum group minerals.*

Анализ задач рудообразования и прикладной минералогии предполагает получение необходимой информации о химическом и минеральном составе как для объекта исследования в целом (породы, руды, технологического продукта), так и для различных его составляющих, в том числе для акцессорных (и малых) минералов, присутствующих в образце даже с единичными зернами. Отсюда следует, что успешное минералогическое исследование должно включать обязательные операции дробления и интенсивного обогащения первичного материала.

Оптимальным для минералогических работ является использование ЭИД [1] образца высоковольтными разрядами (> 100 кВ) в воде. Эффект был открыт в СССР, на его базе разработаны и широко применялись различные технологии [20, 22]. При разрушении диэлектрика в твердом теле с высокой скоростью распространяется расширяющийся канал разряда, заполненный плотной плазмой. При взрыве (пробое) происходит разрыв твердого куска на фрагменты вдоль ослабленных зон, преимущественно по границам зерен фаз, особенно с различной электропроводностью [9, 20, 22, 39].

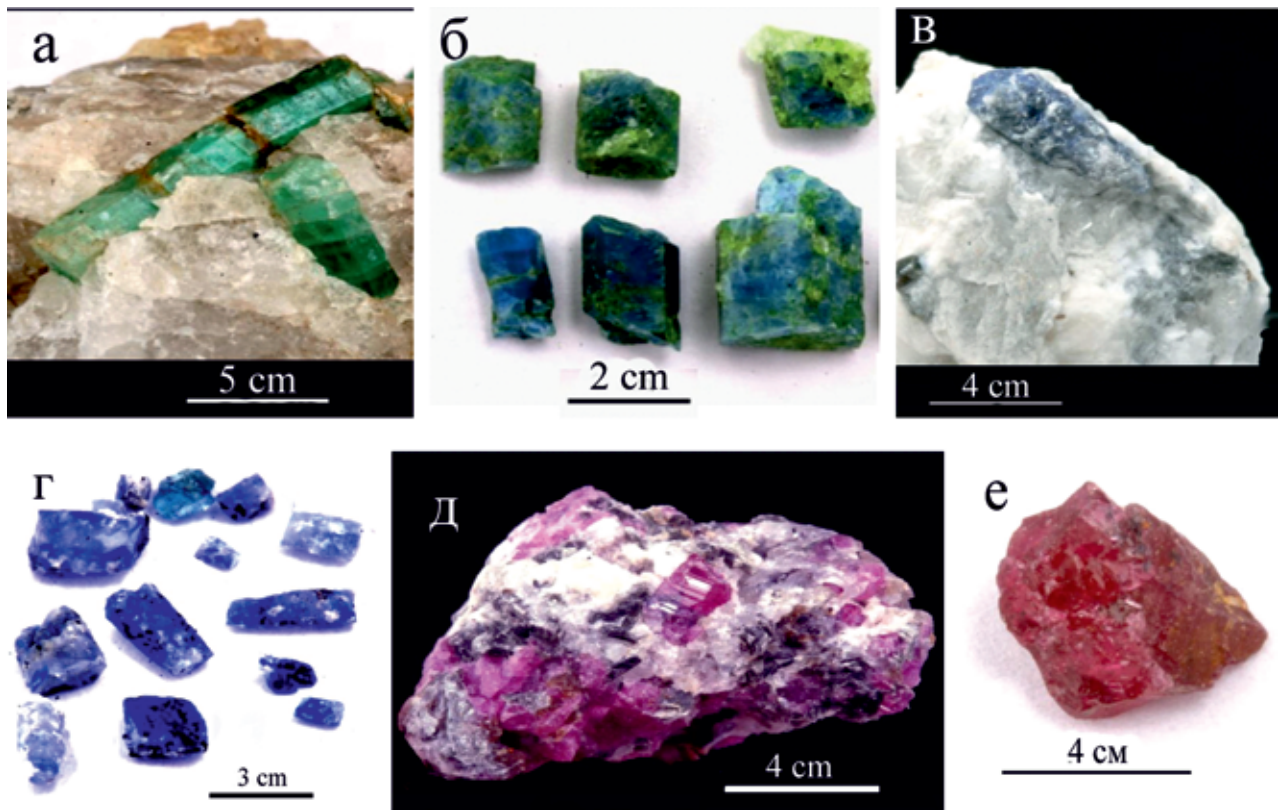


Рис. 1. Примеры извлечения из крупнозернистого кристаллосырья методом ЭИД изумруда (месторождение Тса Да Глица, Юго-Восточный Юкон) – а, б; сапфира (месторождение Белуга, о. Баффинова Земля, Нунавут, Канада) – в, г; рубина (месторождение Апалутук, ЮЗ Гренландия) – д, е. ЭИД-установка EPD Spark-2

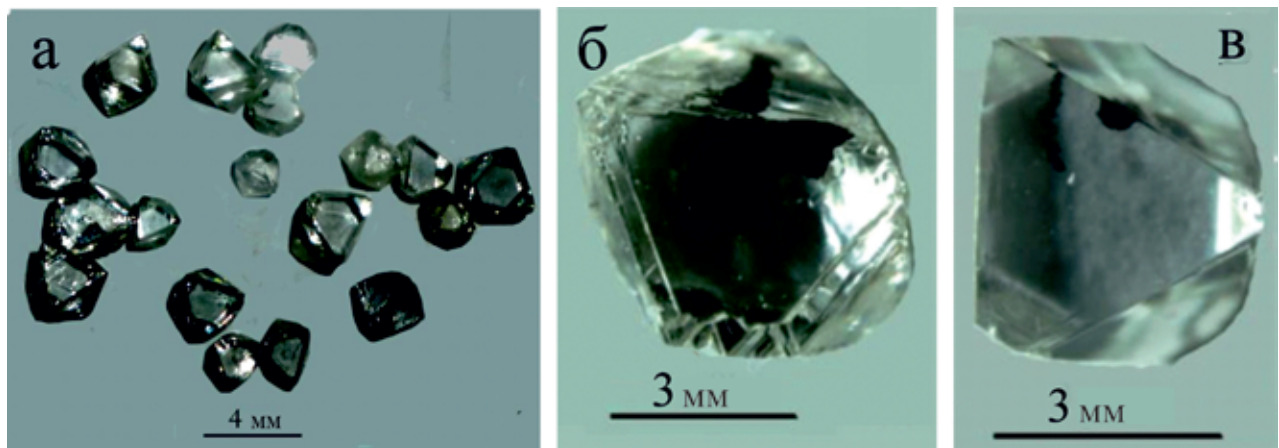


Рис. 2. Крупные кристаллы алмаза якутских кимберлитов (а–в), извлеченные методом ЭИД из «модельных» образцов. ЭИД-установка EPD Spark-2

Эксклюзивные преимущества технологии – максимальная сохранность размеров и формы зерен минералов в продукте дробления и минимальное измельчение материала.

Нами реализована новая установка для ЭИД материалов, которая уже применяется для извлечения ненарушенных полудрагоценных кристаллов и зерен изумруда, сапфира, рубина и др. (рис. 1). На примере «модельных» образцов показана возможность извлечения идеальных (без поврежденный) крупных кристаллов алмаза якутских кимберлитов (рис. 2). Установка коммерчески доступна и используется в ряде лабораторий университетов

и добывающих компаний РФ, Канады, США и Европы (см. www.cnt-mp.com).

Недостаток ЭИД-метода – относительно малая доля тонкой фракции в продукте измельчения образца: < 40 % фракции 0,5 и ~ 20 % фракции 0,3 мм. При малом объеме пробы компромиссным является способ стадийного кратковременного (экспозиция 3–10 с) механического измельчения (например, на стирателе) крупной фракции продукта ЭИД (1–0,5 мм). Опыт показывает, что после первичной ЭИД обработки образца (pre-weakening) при повторном его механическом измельчении границы между зернами легко вскрываются

(степень измельчения первичного материала минимизируется).

При переработке твердых полезных ископаемых широко используются различные технологии – гравитационные, флотационные, гидрометаллургические, иногда пирометаллургические. При исследовательских работах для руд коренных месторождений и различных их технологических продуктов обычно применяют гравитационные методы – широкий спектр технологий и оборудования: концентрационные столы, шлюзы и винтовые сепараторы, струйные, вибрационные и центробежные концентраторы, технологии тяжелых сред, промывки и отсадки руд [19, 21]. Полученные традиционными способами «тяжелые» концентраты для их дальнейшего минералогического анализа обычно должны быть сокращены по объему и обогащены с помощью тяжелых жидкостей [32].

Для обогащения продуктов, содержащих в первую очередь минералы благородных металлов, созданы новое устройство и технология для разделения по плотности твердых частиц измельченных материалов: это гидравлический классификатор – гидросепараторы HS-02 и HS-11 и метод гидросепарации (ГС-технология) [12–14, 41], с помощью которого производится разделение материалов с различной плотностью в пульсирующем водном потоке. Конкуренция масс частиц, захваченных восходящим слабым ламинарным потоком, приводит к осаждению «тяжелых» частиц на дно разделительной трубки и удалению «легкой» фракции. Классификация измельченного материала по размерам зерен (все зерна в пределах одной фракции имеют близкие размеры) обеспечивает при ГС реальное разделение образца по плотности фаз, а не по весу частиц, как это имеет место практически во всех гравитационных приборах и технологиях, за исключением тяжелых жидкостей. Однако они очень токсичны и, кроме того, не могут использоваться для тонкозернистых продуктов (< 0,1 мм) из-за высокой вязкости тяжелых жидкостей. Обогащение методом ГС позволяет получить статистически представительный концентрат «тяжелых» минералов [28] для всего объема образца при крупности частиц от < 10 до 500 мкм. Гидросепараторы HS-02 и HS-11 коммерчески доступны и широко используются в лабораториях более 20 стран: России, США, Канады, Австралии, Франции, Германии, Китая, Индии и др. (см. www.cnt-mp.com).

Объединение двух взаимодополняющих методов ЭИД+ГС позволяет сформировать универсальную технологию минералогических исследований коренных пород, руд и полученных из них технологических продуктов. Эта технология

включает следующие операции: минералогические и физико-химические исследования первичного образца в целом; дезинтеграция материала; разделение измельченного материала по крупности зерен мокрым ситованием; получение методом ГС «тяжелых» концентратов каждой размерной фракции; отбор характерных зерен полезных (индикаторных) минералов (по форме, цвету, блеску, наличию спайности) из крупных (> 125 мкм) фракций «тяжелых» концентратов; изготовление однослойных полированных шлифов для всех размерных фракций «тяжелых» концентратов; минералогические и физико-химические исследования полированных шлифов «тяжелых» концентратов и отобранных характерных зерен; синтез и обобщение полученной информации применительно к задачам исследования. Детальные минералого-геохимические и физические исследования исходной пробы и «тяжелых» концентратов всех ее размерных фракций являются составляющими *3D-технологии минералогических исследований*.

Использование ЭИД+ГС обеспечивает максимальную сохранность и накопление первичных зерен с высокой плотностью в «тяжелых» концентратах, даже очень мягких минералов благородных металлов, таких как самородное золото, акантит Ag_2S , хлораргирит $AgCl$ (твердость 2–2,5), йодаргирит AgI (твердость 1,5), в том числе в продуктах ЭИД, состоящих на 97–98 % из твердого кварца (рис. 3). Разрушение фрагментов первичной руды происходит преимущественно в ослабленных зонах, на границах зерен минералов. Так, зерна самородного золота из карельских руд (рис. 3, а, б) сохраняют прямолинейные очертания (поскольку они формировались между кристаллами арсенопирита и лёллингита). Зерна Hg-золота (Au, Hg, Ag) в продукте ЭИД образца из Веладеро имеют классическую колломорфную структуру, характерную для руд вулканогенной формации (рис. 3, в, г). Галогениды серебра – хлораргирит $AgCl$ и йодаргирит AgI – это нередко идиоморфные зерна и кристаллы (рис. 3, д, е).

Примеры типичных зерен МПГ, выделенных и отобранных из крупных фракций «тяжелых» концентратов продуктов ЭИД руд, представлены на рис. 4.

ЭИД+ГС технология сегодня успешно используется специалистами различных стран мира, что подтверждает более 300 публикаций (см. сайт www.cnt-mp.com). Выделим наиболее востребованные задачи: исследование руд месторождений благородных металлов – ЭПГ и золота, новых минералов благородных металлов; изучение потенциально алмазоносных пород; обнаружение и извлечение

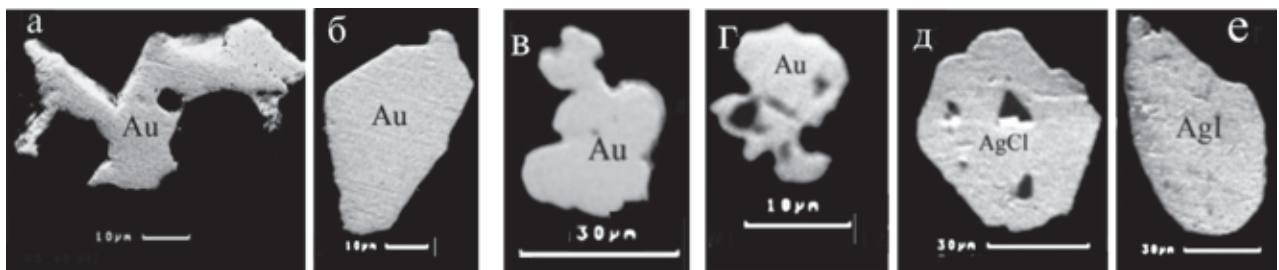


Рис. 3. Зерна самородного золота (а, б – рудопоявление Луопенсуло, Карелия; в, г – месторождение Веладеро, Аргентина) и галогенидов серебра (д, е – месторождение Веладеро) в «тяжелых» ГС-концентратах продуктов ЭИД руд. SEM BSE-фото

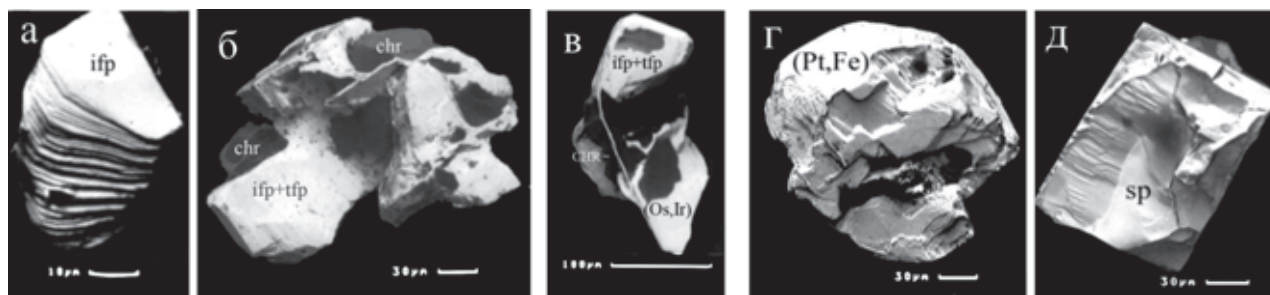


Рис. 4. Зерна минералов платиновой группы, извлеченные из «крупных» фракций «тяжелых» ГС-концентратов различных типов пород и руд

a – кристалл изоферроплатины (ifp) из хромитовых гнезд в дунитах Кондерского массива, Алданский шит, РФ; *б, в* – зерна-сростки изоферроплатина+тетраферроплатина (tfp)+самородный осмий (Os, Ir)+хромит (chr) из хромитовых гнезд в дунитах, Нижнетагильский массив, Урал; *г, д* – зерна Fe-Pt сплавов (*г*) и сперрилита (*д*) из гортонолитовых дунитов трубки Дрейкоп, бушвельдский комплекс, ЮАР; SEM BSE-фото, Camscan-4DV, спектрометр AN-10000

микрообъектов для геохронологии (кристаллы циркона, бадделейта, апатита, рутила, зерна Os-минералов, микрофоссилий и др.).

Руды месторождений благородных металлов.

Характерные особенности: низкие концентрации полезных компонентов – от десятых грамм на тонну до первых сотен грамм на тонну (в богатых рудах); малые размеры зерен минералов благородных металлов – обычно от первых до десятков микрометров; сложный полиминеральный состав.

От измельченного продукта, содержащего благородные металлы образца, методом ультразвуковой седиментации отделяется шламовая (< 10 мкм) составляющая. Шламовая фракция далее характеризуется методами химического анализа (на благородные металлы и некоторые индикаторные элементы). Однослойные полированные шлифы, приготовленные из «тяжелых» ГС-концентратов различной крупности, получают горячим прессованием с органическим компаундом. «Тяжелые» концентраты накапливают характерные минералы с высокой плотностью (более 4,5 г/см³). Это могут быть минералы прерудной ассоциации (в которой нередко локализуются минералы благородных металлов) и продукты собственно рудной ассоциации – минералы благородных металлов и сопровождающие их синхронные минералы. Удельная плотность минералов благородных металлов существенно выше даже по сравнению с сульфидами. Так что в «тяжелых» ГС-концентратах реализуется обычное обогащение МПГ и Au-минералов в десятки-сотни раз по отношению к исходному материалу.

«Тяжелые» концентраты ГС обеспечивают возможность получения уникальной информации: сканированием полированных шлифов ГС-концентратов различных размерных фракций на микрозонде регистрируются SEM BSE-изображения всех зерен минералов благородных металлов (обычно десятки-сотни зерен в одном полированном шлифе), выполняются диагностика и определение химического состава минералов, проводятся определение и классификация ассоциаций этих минералов в зернах-сростках. Таким образом, формируется представительная общая минералогическая база данных для исследуемого образца: полный набор минералов благородных металлов; сульфиды и/или другие околорудные минералы; породообразующие минералы.

Монослойные полированные шлифы «тяжелых» ГС-концентратов различных размерных фракций и высокая статистика в них «малых» минералов дают возможность измерения *сечений их зерен, близких к срединным*. Поэтому полученные оценки размеров зерен статистически представительны. Площади определяются по электронным изображениям зерен с использованием интернет-программы imageJ <https://ru.wikipedia.org/wiki/ImageJ>. По площади зерна рассчитывается его *эквивалентный диаметр* (ECD, мкм, equivalent circle diameter) – диаметр круга, равного по площади электронному изображению зерна. Эти параметры, например МПГ или содержащие МПГ агрегаты зерен минералов, определяются и накапливаются в базе минералогических данных. Отметим, что установленные размеры зерен минералов благородных металлов (при бережном измельчении материала) обычно в 2–5 раз больше, чем при определении их в многочисленных обычных полированных шлифах руд. Это вполне понятно, ведь в шлифах руд измеряются случайные, далекие от срединных сечения зерен, к тому же полученные для очень редких в рудах минералов.

Полированные шлифы «тяжелых» ГС-концентратов – оптимальные объекты для современных физико-химических исследований «малых» минералов руд. Выполняется автоматический анализ (MLA, mineral liberation analysis) для одной или нескольких размерных фракций образца. Определяются полный минеральный состав «тяжелых» ГС-концентратов, размеры зерен минералов благородных металлов и соотношения различных типов зерен этих минералов (степень их высвобождения) в измельченном продукте. Методом LAM-ICP-MS-анализа (laser ablation microprobe-inductively coupled plasma-mass spectrometry) с чувствительностью < 1 г/т измеряются рассеянные (следовые) концентрации благородных металлов и некоторых индикаторных элементов в сульфидах (в пентландите, пирите, халькопирите и др.), важные для трактовки процесса рудообразования и анализа распределения благородных металлов в рудах и технологических продуктах.

Использование новой минералогической технологии ЭИД+ГС благодаря ее *высокому уровню «фазовой» чувствительности и пространственного разрешения* для «тяжелых» минералов в полированных шлифах «тяжелых» концентратов, в первую очередь минералов Au и ЭПГ, позволяет получать

Руды благородных металлов различных классических генетических типов, изученных с использованием ЭИД+ГС

Объект	Породы, руды	Страна
Скаергаардский массив, Платиновый Риф	Ti-магнетитовые, Pt-Au-Pd руды	Дания, Гренландия
Бушвельдский комплекс, UG2, LG6, M1,2	Хромититы, ЭПГ-руды	ЮАР
Бушвельдский комплекс, Риф Меренского	Осн. у/о породы, Au-ЭПГ-руды	ЮАР
Массив Палабора, м-ние Люлекоп	Карбонатиты, Ag-Au-Pd-Pt-руды	ЮАР
Ковдорский массив	Карбонатиты, Ag-Au-Pd-Pt-руды	РФ, Кольский п-ов
Березовское месторождение	Au-Ag гидротермальные руды	РФ, Урал
Месторождение Веладеро	Au-Ag вулканогенные руды	Аргентина

статистически представительные данные на относительно малых образцах руд и технологических продуктов весом *от первых сот граммов до 2 кг* (в том числе музейные образцы и фрагменты керн-на скважин). Образец может быть в виде штуфов, продукта их дробления (крупностью 2–5 мм после усреднения состава образца) или измельченного продукта произвольной крупности.

Приведем лишь некоторые результаты 3D-минералогических исследований на различных классических месторождениях руд благородных металлов (табл. 1) и на многих других объектах.

Месторождение Платиновый Риф, Скаергаардский массив, Гренландия, малосульфидного типа: стратиформная группа слоев толеитовых габбро, обогащенных Fe-Ti- оксидами и благородными металлами Pd, Au и Pt. Месторождение открыто в 1980-х годах. Первичная базовая информация о Скаергаардской интрузии содержится в многочисленных работах [23, 31, 35]. Запасы элементов платиновой группы и золота составляют ~ 1,8 млрд т (при средней концентрации благородных металлов ~2 и бортовом содержании 1 г/т), сульфидов в рудах ~ 0,05 % [23, 35]. Минерализация благородных металлов локализована в серии горизонтов, строго согласных с магматической расслоенностью массива. Самый нижний, собственно «палладиевый» слой содержит до 5 г/т Pd, а в самом верхнем горизонте местами сконцентрировано до 5–10 г/т золота.

Нами изучено 30 образцов руд (более 4000 зерен минералов благородных металлов) – 5 полных разрезов рудных горизонтов по профилю восток–запад через центр интрузии [16, 17]*.

В рудах Скаергаардского месторождения до проведения наших работ определено лишь 9 минералов благородных металлов. Нами установлено более 50 их различных соединений, определены 30 минеральных видов ЭПГ, Au и Ag и еще более 20 сплавов и неназванных минералов этой группы [16, 17]. Нами открыты два новых минеральных вида: *скаергаардит* PdCu – главный Pd-минерал месторождения и *нельсенит* PdCu₃ (см. www.mindat.org). В малосульфидной скаергаардской минерализации, кроме известных ранее основных сульфидов меди и железа (борнит, халькозин, дигенит и халькопирит), установлены еще более десяти других сульфидов Co, Ni, Pb, Zn, Cd, Cu, Fe, а также минералы

As и Te. Отметим, что все элементы этих минералов определены и в составе МПГ и Au-сплавов. В рудах обнаружены редкие МПГ и Au-сплавы, содержащие Ni, Co, Zn, Sb, Bi, Rh, Cr, Hg, Cd, Se и Ti металлов, которые даже не упоминались в составе скаергаардской минерализации. Реализованная минералогическая чувствительность исследований для скаергаардских руд оказалась более высокой, чем физико-химическая, даже с использованием методов масс-спектропии.

Pd-Cu и Cu-Au-сплавы в «тяжелых» концентратах руд присутствуют обычно в составе сростков с сульфидами Cu и Fe или в виде свободных зерен. В «тяжелых» ГС-концентратах руд (и изредка в полированных шлифах руд) установлены многочисленные каплевидные микрозерна Fe-Cu-сульфидов, МПГ и Cu-Au-сплавов (рис. 5).

Результаты LA-ICP-MS-анализов [26] показали аномальные концентрации малых халькофильных элементов (Pd, Au, Pt, Te, Se) в Fe-Cu-сульфидах «палладиевого» и «промежуточных» слоев Платинового Рифа Скаергаардского массива: Te 50–100 и Se 300–500 г/т. Выявлена также характерная особенность сульфидной минерализации «золотого» (верхнего) горизонта месторождения – Fe-Cu сульфиды здесь резко обогащены Te и Se. В них определены включения мелонита NiTe₂ и самородного Te, установлены новообразования неназванных сульфотеллуридов Cu и Fe [17]. Определены пиковые концентрации Se в Fe-Cu сульфидах – 750–1200 г/т (LA-ICP-MS-анализы [26]).

Новые минералогические и физико-химические данные позволили сформулировать и обосновать флюидно-магматическую модель формирования и дифференциации Pt-Au-Pd руд месторождения Платиновый Риф в Скаергаардской интрузии [16, 17, 25, 36].

Месторождение благородных металлов в расслоенной интрузии бушвельдского комплекса, ЮАР. Бушвельдский комплекс включает в себя крупнейшую в мире расслоенную ультрамафит-мафитовую интрузию площадью ~ 66 000 км², с возрастом 2050 млн лет [29, 30]. Интрузия несет самые большие ресурсы элементов платиновой группы (ЭПГ) на Земле (около 68 % Pt и 39 % Pd), а также содержит значительные запасы Cr, V, Au, Ni и Cu [44]. Главные промышленные тела руд платиновых металлов в бушвельдском комплексе – Риф Меренского, хромититы UG-2 и Платриф – приурочены к критической зоне расслоенной интрузии. Они прослеживаются более чем на 100 км в восточной и западной частях бушвельдского комплекса [44]. Хромититовый горизонт

* Результаты исследований детально изложены в 11 опубликованных отчетах Geology Survey of Denmark and Greenland, Ministry of the Environment (GEUS) – Nielsen, Rudashevsky, Rudashevsky et al., 2003–2010.

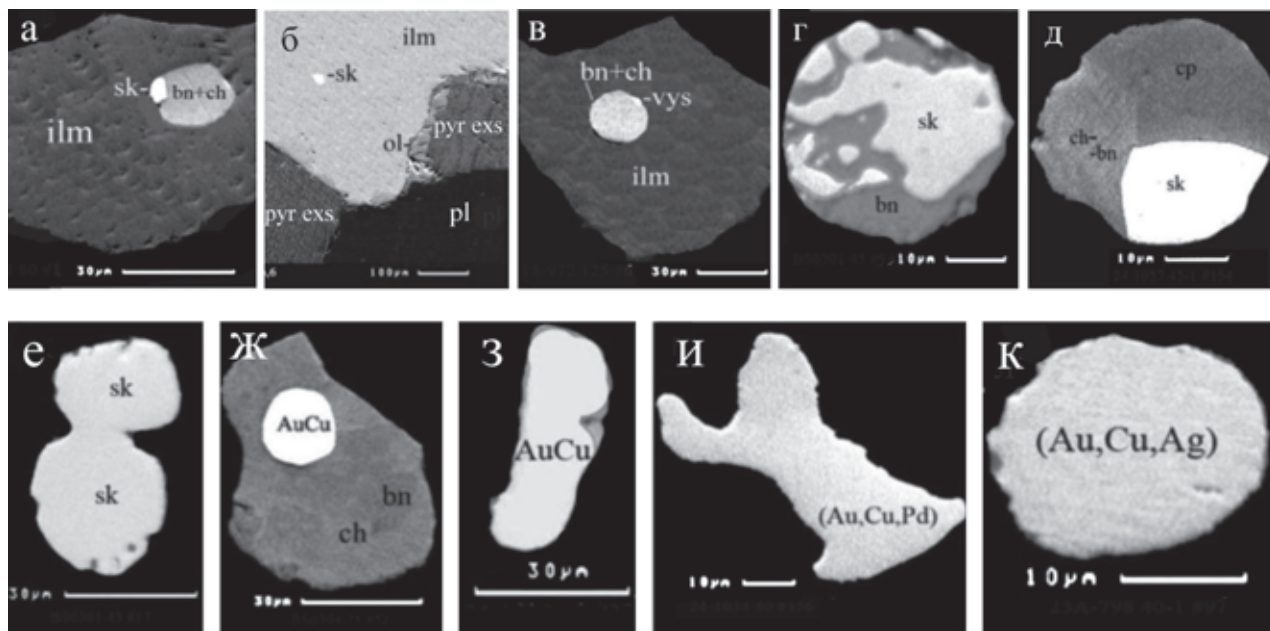


Рис. 5. «Микрокапли» МПГ (б, е), Fe-Cu-сульфидов+МПГ (а, в-д), Fe-Cu-сульфидов+Ag-Cu-Au-сплавы (ж) и Ag-Cu-Au-сплавов (з-к) в рудах месторождения Платиновый Риф, Скаергаардский массив. Полированные шлифы «тяжелых» ГС-концентратов. SEM BSE-фото, Camscan-4DV, спектрометр AN-10000.

sk – скаергардит, vys – высокоцит, AuCu – тетрааурикуприд, (Au,Cu,Pd) и (Au,Cu,Ag) – сплавы Au, Cu, Pd и Ag, bn – борнит, ch – халькозин, ilm – ильменит, ol – оливин, pyr (exs) – структура распада твердого раствора ромбического и моноклинного пироксенов

UG2 находится в верхней части критической зоны непосредственно ниже Рифа Меренского. Кроме главного хромититового горизонта UG2 с содержанием до 10 г/т (PGE + Au), присутствуют другие группы слоев хромититов (LG – нижняя, MG – средняя и UG – верхняя), содержащие более низкие количества ЭПГ (0,5–4 г/т [37]). Недавно компания Sylvania Platinum Ltd (www.sylvaniaplatinum.com) начала перерабатывать хромитовые отвалы из хромититов LG6 и MG1/2 и успешно производит товарные концентраты хромита и платиновых металлов [37].

С использованием технологии ЭИД+ГС нами изучены обогащенные благородными металлами характерные бушвельдские образцы: BD-11/2 – хромититит из горизонта UG2 (Pt+Pd ~ 10 г/т), шахта Куселека, Западный Бушвельд; S – флотационный концентрат, полученный из нижнего горизонта хромититов LG6 (Pt+Pd 546 г/т [37]), Восточный Бушвельд; T – флотационный концентрат, полученный из средних горизонтов хромититов M1 и M2 (Pt+Pd 214 г/т [37]), Восточный Бушвельд; US200 (интервал ~ 1 м), Риф Меренского (Pt+Pd 0,65–8,65 г/т [38]), Восточный Бушвельд; A8-10 – бороздовая проба через Риф Меренского (Pt 21,9, Pd 4,9, Au 3,9 г/т), шахта Нортам, Западный Бушвельд.

В табл. 2 и на рис. 6 приведены результаты определения минералов благородных металлов и оценки распределения этих минералов в изученных образцах. В пяти образцах бушвельдских руд определены 34 минеральных вида благородных металлов и несколько сплавов Pd, Pt, Cu, Rh, Hg, а также незазванный минерал PtSnS. Во всех образцах (кроме A8-10) среди минералов благородных металлов главные – сульфиды Pt и Pd (брэггит, куперит и высокоцит). Хромититы, в отличие от пород Рифа Меренского, бывают обогащены минералами IPGE (Ru, Rh, Os, Ir), тогда как Риф Меренского

содержит эксклюзивно высокое количество Bi-Te-МПГ (мончеит, котульскит и др.), а также обычно обогащен самородным золотом. В хромититах в заметных количествах определены МПГ сурьмы и свинца, а среди МПГ в Рифе Меренского интерметаллиды олова (табл. 2, рис. 6).

Подчеркнем важную особенность бушвельдских рудных тел, в первую очередь изученных хромититов, – наличие в их составе контрастно различных наборов МПГ. Так, нижний хромититовый слой LG6 по сравнению с другими хромититами аномально обогащен Cu-Rh-Pt-тиошпинелями (маланит и купрородсит), а средние горизонты хромититов MG1/2 – арсенидами ЭПГ (сперрилит, холлингвортит и Pd-арсениды), Fe-Pt, Hg-Pt-Cu-Pd сплавами и Sb-Pt-Pd интерметаллидами за счет в первую очередь сульфидов ЭПГ (табл. 2, рис. 6).

Отметим также крайне неравномерное распределение минералов благородных металлов в объеме тела хромититов и в пределах вмещающих их расчлененных пакетов полевощпатовых пироксенитов, габброидов и дунитов. МПГ в большей мере всегда концентрируются в самих хромититах или в непосредственной близости к ним [38].

Фиксируется тесная ассоциация минералов благородных металлов с сульфидами. Сульфидные зерна и агрегаты присутствуют в промежутках между зернами хромита, ортопироксена и плагиоклаза. В составе хромититовых слоев содержание серы 100–200 г/т, тогда как в окружающих их ультраосновных и основных породах на порядок более высокое: количество сульфидов в них увеличивается до 3–5 и даже до 8 % [38].

В «тяжелых» ГС-концентратах всех изученных образцов (крупностью 80 мкм) доминируют свободные зерна минералов благородных металлов (мономинеральные или сростки двух и более минералов) и их агрегаты с рудообразующими сульфидами;

Минералы благородных металлов, установленные в характерных образцах хромититов и Рифа Меренского бушвельдского комплекса

Группа минералов	Группа элементов	Хромититы			Минералы Рифа Меренского	
		UG2 ¹	LG6 ²	MG/1-2 ³	US200 ⁴	A8-10 ⁵
Lr ^{1-3,5} +erl ¹ +Ir ¹ +irs ³	Ru-Os-Ir-S-(As)	62,9	7,9	1,8		< 0,1
brg ¹⁻⁵ +vys ¹⁻⁵ +coop ¹⁻⁵	Pt-Pd-Ni-S	25,9	26,1	20,6	56,1	2,7
mln ¹⁻³ +curh ^{2,3}	Pt-Rh-Cu-S	1,1	62,5	4,7		
sp ^{3,5} +hol ^{2,3} +ptas ^{2,3} +vnc ³ +apd ³ +mjk ³ +pdas ^{2,3}	Pt-Pd-(Rh,Ni)-As		0,5	46,3	< 0,1	4,3
(Pt,Fe) ^{2,3,5} +tul ^{1,3} +(Pt,Rh) ³ +(Pd,Cu,Pt,Hg) ²	Pt-Fe-Cu-Pd-Rh-Hg	3,0	4,0	12,3	2,0	32,2
(Au,Ag) ^{1,3-5}	Au-Ag	7,0		0,1	20,0	4,2
mnch ^{2,3,5} +kt ^{3,5} +kth ² +sob ² +hs _{3,5} ⁵ +msl ⁵	Pt-Pd-Ag-Te-Bi	0,1	0,4	0,1	18,9	52,0
ism ³ +mrt ³ +sbpd ³ +nld ³ +sdb ³ +gvs ^{2,3}	Pd-Pt-Sb		0,1	10,8		
rst ^{4,5} +plv ⁵ +at ₅ +gnk ⁵ +PtSnS ⁴	Pd-Pt-Sn				3,0	4,4
zv ^{2,3,5} +(Pd,Pb) ² +Ag ₂ S ⁵	Pd-Pb		1,5	0,9		< 0,1

Примечание. Lr – лаурит (Ru,Os,Ir)S₂, erl – эрликманит (Os,Ru,Ir)S₂, Ir – иридий самородный (Ir,Os,Pt), irs – ирарсит IrAsS, brg – брэгит (Pt,Pd,Ni)S, vys – высокоцит (Pd,Pt,Ni)S, coop – куперит, PtS, mln – маланит Cu(Pt,Rh)₂S₄, curh – купородсит Cu(Rh,Pt)₂S₄, sp – сперрилит PtAs₂, hol – холлингвортит RhAsS, ptas – платарсит PtAsS, vnc – винцентит Pd₃As, apd – арсенопалладинит Pd₈(As,Sb)₃, mjk – маякит PdNiAs, pdas – палладоарсенид (Pd,Ni)₂As, (Pt,Fe) – платино-железистые сплавы, tul – туламинит Pt₂Fe(Cu,Ni), (Pt,Rh) и (Pd,Cu,Pt,Hg) – сплавы Pt и Rh, Pd,Cu,Pt и Hg, (Au,Ag) – самородное золото, mnch – мончеит Pt(Te,Bi)₂, kt – котульскит PdTe, kth – кейтконнит Pd_{3-x}Te, sob – соболевскит Pd(Bi,Te), hs – гессит Ag₂Te, msl – масловит PtTeBi, ism – изомертиит Pd₁₁Sb₂As₂, mrt – мертиит (I и/или II) Pd₁₁(Sb,As)₄, sbpd – стибипалладинит Pd₂Sb₂, nld – налдреттит Pd₂(Sn,Sb), sdb – садберит (Pd,Ni)Sb, gvs – геверсит PtSb₂, rst – рустенбургит (Pt,Pd)₃Sn, plv – паоловит (Pt,Pd)₂Sn, at – атокит (Pd,Pt)₃Sn, gnk – генкинит (Pt,Pd)₄Sb₃, PtSnS – неназванный, zv – звягинцевит Pd₃Pb, (Pd,Pb) – неназванный, Ag₂S – акантит/аргентит; здесь и на рис. 6 и 7 группы минералов и минералы рассчитаны по площадям их зерен, % (сумма площадей зерен минералов 100 %). Образцы 1 – UG2, 2 – LG6, 3 – MG1/2, 4 – US200, 5 – A8-10.

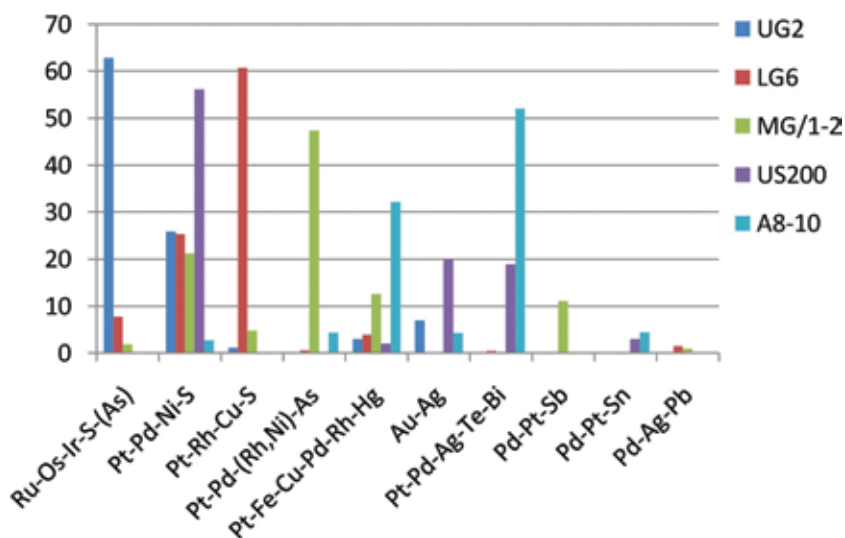


Рис. 6. Гистограмма распределения минералов благородных металлов (%) в образцах хромититов и Рифа Меренского бушвельдского комплекса (табл. 2)

зерна-сростки с другими минералами (с хромитом, силикатами, карбонатами) не превышают первых процентов (рис. 7). Во всех образцах хромититов в зернах-сростках с МПГ присутствуют пентландит (в обр. BD-11/2 еще и виоларит), халькопирит и пирит, изредка миллерит (Т); в рудах Рифа Меренского – пентландит, халькопирит, пирротин и пирит (US200) или пентландит, халькопирит, пирротин и троилит, изредка кубанит (A8-10). Подчеркнем, что в хромититах среди сульфидов Fe, Ni и Cu, судя по их взаимоотношениям, первым кристаллизовался пирит.

В хромититах и породах Рифа Меренского сопровождающие МПГ сульфиды, в первую очередь пентландит, содержат высокие примеси Pd,

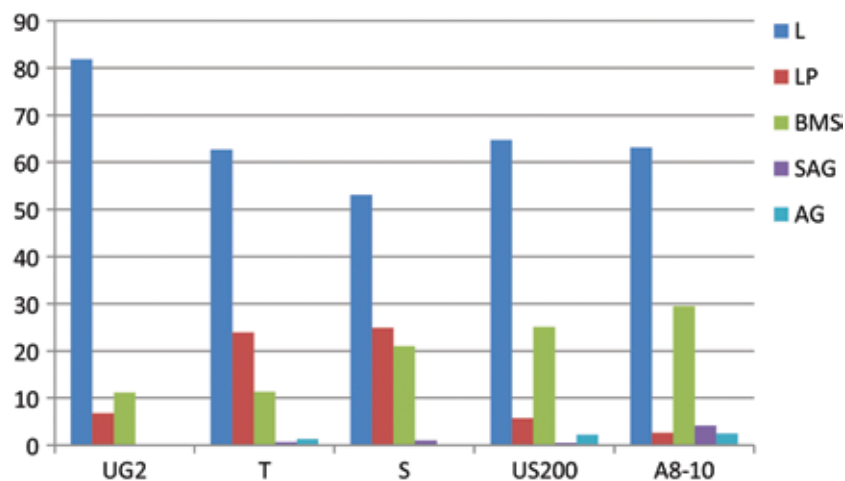
Rh и несколько меньшие IPGE, что характерно для первично-магматических их генераций [27, 38].

Приведенные минералогические данные показывают, что богатые ЭПГ магматические сульфиды выделялись одновременно с хромитом. Сульфиды концентрируют благородные металлы из-за высоких коэффициентов распределения между сульфидной и силикатной жидкостями – не менее 10⁴ и, возможно, до 10⁷ [24].

Наиболее вероятная модель формирования руд благородных металлов в расслоенных ультрамафит-мафитовых породах бушвельдского комплекса – флюидно-магматическая. Распределение благородных металлов в бушвельдских хромититах достоверно трактуется как процесс их рэлеевского

Рис. 7. Гистограмма распределения различных типов зерен минералов благородных металлов (%) в продукте измельчения (80 мкм) образцов BD-11/1 (UG2), T (MG1/2), S (LG-6), US200 и A8-10 (оба из Рифа Меренского)

L – свободные зерна мономинеральные, LP – свободные зерна-сростки двух и более МПГ, BMS – сростки с сульфидами, SAG – сростки с сульфидами и другими минералами руд, AG – сростки с хромитом, силикатами, карбонатами



(rayleigh) фракционирования: малые халькофильные элементы наиболее сильно концентрировались преимущественно уже в первой порции (максимально сернистой) сульфидной жидкости и быстро истощались в остаточной части сульфидного расплава [45]. В согласии с этой моделью находятся следующие рассмотренные выше факты: наиболее ранняя кристаллизация в хромититах пирита по отношению к другим сульфидам; крайне неравномерное распределение ЭПГ (и МПГ) в пределах одного тела хромититов; наличие в изученных группах хромититов контрастно различных наборов МПГ; наиболее ранняя среди МПГ кристаллизация в хромититах именно сульфидов: брэггит, лаурит, куперит и висоцкит в образцах BD11/2 и T или Си-тиошпинели (маланит и купрородсит) в обр. S.

Контрастно низкие содержания серы в хромититах по сравнению с вмещающими их мафит-ультрамафитами предполагают перераспределение первичной серы между ними: удаление серы из хромититов флюидом и/или вследствие реакции сульфидов с хромитом [34]. Высокотемпературный магматический флюид, синхронный с интеркумулясным сульфидным расплавом [16, 17], обеспечивал дифференциацию серы, «летучих» элементов и благородных металлов – концентрирование в породах Рифа Меренского теллуридов ЭПГ и минералов золота.

Минерализация благородных металлов в карбонатах. Щелочно-ультраосновная магматическая формация относится к числу платиноносных. Традиционно известна Fe-Pt-минерализация в гнездах хромшпинелидов дунитов щелочно-ультраосновных комплексов [7]. Самостоятельным экономически перспективным и практически не изученным типом концентраций благородных металлов оставалось месторождение Люлекоп в щелочно-ультраосновном массиве Палабора (ЮАР). Благородные металлы (Au, Pt, Pd, Ag) присутствуют здесь в сульфидной минерализации камафоритов (фоскоритов) и карбонатитов [43]. Палаборская горная компания с 1968 г. извлекает благородные металлы путем электролитической очистки, полученной из карбонатитов анодной меди. Вместе с тем, минералы-носители благородных металлов, кроме редкого науманнита Ag_2Se [43], в рудах месторождения Люлекоп не установлены. Наиболее близок к массиву Палабора по геологическому строению, разнообразию и типам полезных ископаемых Ковдорский массив на Кольском п-ове, РФ.

Использование технологии ЭИД+ГС обеспечило обнаружение впервые минералов благородных металлов в фоскоритах и карбонатитах щелочно-ультраосновных комплексов Ковдорского массива и месторождения Люлекоп [8, 10, 40].

Ковдорский массив. Изучены образец сульфидов (1–3 %) редкометалльных руд и сопровождающих их карбонатитов, а также сульфидный гравитационный продукт Ковдорского ГОКа – усредненную сульфидную минерализацию редкометалльных руд и карбонатитов (Pt 0,22, Pd 0,22, Rh 0,04, Ru 0,05 и Au 0,06 г/т). Установлено 31 зерно минералов благородных металлов [10, 40]. На микрозонде в полированных шлифах «тяжелых» ГС-концентратов определены 6 Pt, 10 Pd и 4 Ag-Au минерала: золото самородное (Au,Ag), электрум Au,Ag, гессит Ag_2Te и аргентопентландит $Ag(Fe,Ni)_8S_8$. Размер зерен минералов благородных металлов (эквивалентный диаметр) 2–68, средний $37,6 \pm 8,6$ мкм. Минералы благородных металлов тесно ассоциируют с сульфидами – пирротинном, халькопиритом и галенитом.

Месторождение Люлекоп. Изучены характерный образец карбонатитов, а также флотационный сульфидный концентрат – промежуточный продукт обогащения карбонатитовых руд фабрики Phalaborwa Mining Co, содержащий Pt 0,23, Pd 0,40, Au 2,0 г/т. Установлено ~ 100 зерен минералов благородных металлов [8, 40], на микрозонде в полированных шлифах «тяжелых» ГС-концентратов определены 9 минералов Pd и Pt, а также 9 минералов Au и Ag – тетрааурикуприд $AuCu$, электрум AuAg, золота самородное Au_3Ag и кюстелит Ag_3Au ; серебро самородное, аргентопентландит $Ag(Fe,Ni)_8S_8$, гессит Ag_2Te , ялпайт $Cu(Ag,Fe)_3S_2$ и штрмейерит $Ag_{1-x}Cu_{1+x}S$. Размер зерен минералов благородных металлов (эквивалентный диаметр) 16–124, средний 45 ± 10 мкм.

Выделенные зерна МПГ чаще мономинеральные, иногда также зерна-сростки сперрилита и кабриита с вмещающими их борнитом и халькопиритом. В «тяжелых» ГС-концентратах установлены Au-Ag-Cu минералы со структурой распада твердого раствора: тетрааурикуприда и электрума; кюстелита и электрума; электрума, кюстелита и самородного золота Au_3Ag . Выявлены сростания Ag-Au-минералов с рудообразующими минералами тетрааурикуприда и электрума с борнитом, кобальтпентландитом и дигенитом; кюстелита с халькопиритом и борнитом, а также с висмутом

самородным; самородного серебра с кобальтпентландитом, халькопиритом, борнитом, дигенитом и галенитом; с паркеритом $Ni_3Bi_2S_2$, висмуту самородным, с бетехтинитом $Cu_{10}(Fe,Pb)S_6$, ялпаитом $Cu(Ag,Fe)_3S_2$ и со штрмейеритом $Ag_{1-x}Cu_{1+x}S$.

Процессы кристаллизации минералов благородных металлов в карбонатитах месторождения Люлекоп оцениваются как средне-низкотемпературные (480–80 °С). Несмотря на известное геолого-петрографическое подобие ковдорского и палаборского карбонатитовых комплексов, имеются существенные различия в наборе присутствующих в них минералов Pt, Pd, Au и Ag [20, 24], а главное, в ассоциациях, сопровождающих эти минералы сульфидов. В палаборском комплексе сульфидная минерализация резко обеднена серой и обогащена медью по сравнению с ковдорским. Обогащенные Pt, Pd, Au и Ag сульфидные минерализации в карбонатитах Ковдорского и Палаборского массивов представляют, видимо, два их контрастных типа для фоскорит-карбонатитовых руд, формировавшихся из различных по составу сульфидных расплавов: обогащенного серой более высокотемпературного, формирующего *mss*, преобладающего при охлаждении в ассоциацию сульфидов пирротин+пентландит+халькопирит, и низкосернистого, обогащенного медью относительно низкотемпературного, генерирующего *iss*, и при охлаждении богатые медью минеральные ассоциации борнита, троилита, минералов ряда халькозин-джарлеит и еще более низкотемпературные (гидротермальные), содержащие паркерит $Ni_3Bi_2S_2$, висмут самородный, виттихенит Cu_3BiS_3 и бетехтинит $Cu_{10}(Fe,Pb)S_6$.

Березовское золоторудное месторождение, Урал. Здесь была открыта первая в России шахта для добычи золота уже в XVIII в. ООО «Березовский рудник» использует для извлечения Au и Ag технологию чанового цианидного выщелачивания гравитационно-флотационного концентрата руд. Потери золота в хвостах (кеках) этого передела в среднем 2,5 г/т. Проведен критический анализ природы потерь золота в этом технологическом продукте. Установлено, что главная доля технологических потерь – неизвлеченное самородное золото из крупных фракций отвалных кеков. Хвосты содержат Au от 8,2 (фракция 0,5–0,3 мм) до 1,3 г/т (фракция < 0,1 мм). Очевидное *технологическое решение* для минимизации потерь золота – граница измельчения первичного Au-концентрата должна быть существенно ниже 100 мкм [15].

В ходе опытных полупромышленных испытаний выявлено, что при условии раздельного выщелачивания шламовой и «песковой» фракций флотоконцентрата с синхронным доизмельчением «песков» до –50 мкм содержание Au в кеках может быть снижено до 0,7–0,9 г/т. Показано также, что при использовании этой технологии возможна переработка складированных «богатых» (2,3–2,5 г/т Au) хвостов цианирования с получением отвалных кеков, содержащих < 1 г/т Au [15]. Сегодня это уже внесено в технологический регламент извлечения благородных металлов из руд Березовского месторождения и из складированных «богатых» хвостов их переработки.

Au-Ag месторождение Веладеро. Руды этого крупнейшего в Аргентине и одного из наиболее крупных в мире золоторудных объектов перерабатываются по технологии кучного щелочного цианирования.

Большая часть серебра (> 90 %) не извлекается. Предполагалось, что основная доля серебра в рудах представлена акантитом Ag_2S , присутствующим в виде включений размерами 1–3 мкм в кварце рудовмещающих метасоматитов.

Изучены образец характерной Au-Ag руды месторождения (Au 3,2, Ag 44,3 г/т, SiO_2 98,2, S 0,06 %) и образец руды, богатой серебром (Au 0,3, Ag 236 г/т, SiO_2 98,0, S 0,03 %).

В «тяжелых» ГС-концентратах первого образца руды изучено 358 зерен минералов Au и Ag: Hg-золото (Au,Hg,Ag), петровскиит $AuAgS$, акантит, хлораргирит $AgCl$, йодаргирит AgI , имитерит Ag_2HgS_2 . Ag-минералы ассоциированы с сульфидами, сульфид-галогенидами и селенидами ртути. Самородное золото – мелкие зерна (0,5–48, среднее 7 мкм) с колломорфной структурой. Ag-минералы существенно крупнее, десятки мкм (рис. 3, в–е). Самородное золото – наиболее раннее по отношению к минералам серебра и ртути.

В «серебряном» типе руд в «тяжелых» ГС-концентратах обнаружено ~ 1500 частиц Ag-минералов, размеры их зерен обычно от десятков до 240 мкм. Преобладают йодаргирит и хлораргирит, обнаружены редкие зерна бромаргирита $Ag(Br,Cl)$, самородного серебра, акантита и науманнита Ag_2Se . Галогениды серебра здесь также сопровождаются минералами ртути. Самородное серебро замещается йодаргиритом и хлораргиритом. Обнаружены мелкие реликты самородного золота (1–3 мкм) в йодаргирите. Минералы Au и Ag тесно ассоциируют с оксидами гидроокислами Fe и Ti (рутил и гётит) и сульфатами – барит $BaSO_4$, ярозит $KFe^{3+}_3(SO_4)_2(OH)_6$ и алуниит $KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$.

Веладеро – характерное убогосульфидное Au-Ag месторождение *вулканогенной формации* Тихоокеанского пояса. Источник гидротерм в основном *метеорный* с участием магматогенных компонентов. Контаминация магматогенных компонентов, несущих благородные и тяжелые металлы метеорными водами, насыщенными кислородом, а также Cl, I и Br (влияние океана через дожди) определяли интенсивный прерудный кислотный метасоматоз рудовмещающей толщи в крупных масштабах. Результат этого процесса – вынос большинства компонентов, кроме SiO_2 и TiO_2 , и формирование преимущественно кварцевых метасоматитов.

Высокие технологические потери серебра при переработке руд месторождения имеют место, поскольку доминирующие Ag-минералы руд – акантит, хлораргирит и йодаргирит – не растворяются (при нормальных условиях) в щелочных цианидах. Au-Ag-минерализация локализована среди кварцевых метасоматитов (97–98 % кварца). Массовая доля околорудных минералов всего 2–3 % от общей массы руды. Отсюда сформулировано *новое технологическое решение*. Возможно последовательное *раздельное* извлечение *сначала* Au (традиционное цианирование), *затем* Ag – гравитационным концентрированием хвостов первого технологического передела руд (плотность кварца 2,8, минералов серебра выше 5 г/см³). Из малого объема серебряного концентрата (3–5 % от массы хвостов цианирования, расчетное содержание в концентрате Ag ~ 1000 и Au ~ 10 г/т) возможно восстановление Ag и Au сульфидных и галогенидных соединений и далее извлечение этих металлов по гидрометаллургической технологии щелочного цианирования.

Характеристика новых МПГ, открытых с использованием 3D-минералогической технологии¹
(см. www.mindat.org)

Минерал	Формула	Зерна		Месторождение
		кол-во	размеры, мкм	
Скаергаардит	PdCu	2054	0,1–93	Платиновый Риф, Скаергаард
Нельсенит	Pd,Cu ₃	72 (12) ²	2–50	То же
Надреттит	Pd ₂ Sb	622	10–239	СЗ Месамакс, Квебек, Канада
Унгаваит	Pd ₄ Sb ₃	8	36–116	То же
Гарутиит	(Ni,Fe,Ir)	20	10–110	Лома Пегуэра, Доминиканская Республика
Палладосилицид	Pd ₂ Si	13	0,7–39	UG2, Бушвельд; Капалагулу, Танзания

Примечания. 1. Приведены только данные для МПГ, открытых с нашим участием. Другие МПГ рассматриваемой группы – заккаринит RhNiAs и колдвеллит Pd₃Ag₂S (см. www.mindat.org). 2. Нельсенит открыт в результате изучения 12 его зерен в одном образце руды, позже в 10 других образцах определено еще 60 зерен нельсенита.

Новые минералы элементов платиновой группы.

С 2002 г. Международной комиссией по новым минералам утверждены 24 новых минерала ЭПГ, 8 (т. е. 1/3) из них в составе коренных руд различных месторождений открыты с использованием рассмотренной 3D-минералогической технологии (табл. 3). В полированных шлифах «тяжелых» концентратов, содержавших рассматриваемые новые МПГ, как правило, присутствует несколько их мономинеральных «крупных» зерен, иногда даже более 10, например для скаергаардита и надреттита.

Минералы ЭПГ – наиболее сложные для исследований. Среди минералообразующих элементов МПГ, кроме ЭПГ, известны еще 23 элемента: Fe, Ni, Cu, Au, Ag, S, As, Te, Se, Sb, Sn, Pb, Bi, Hg, In, Cl, I, Br, Si, Co, Zn, Ti и Mo. В МПГ возможны разные их сочетания, стехиометрические соотношения и типы структур. Проблема определения химического состава МПГ была кардинально решена, начиная с 1960-х годов, использованием микрозондового анализа для зерен размером > 10 мкм. Число утвержденных МПГ в 1959 г. (только 20) сразу увеличилось до 114 в 2002 г. (www.mindat.org). Индивиды МПГ нередко образуют полиминеральные агрегаты, бывают зональными по химическому составу, и, как правило, в полированных шлифах имеют очень малые размеры сечений. Специально выделим, пожалуй, наиболее трудно реализуемое условие для открытия нового МПГ – получение для него рентгенометрических данных, для этого необходимо использование (извлечение) мономинерального «крупного», как минимум 30–40, надежно ~ 100 мкм зерна. Не случайно, что большинство открытий МПГ сделано на материалах россыпей, накапливающих свободные крупные («тяжелые») зерна МПГ.

Приведенная информация о новых открытиях МПГ (табл. 3) иллюстрирует уникальную фазовую чувствительность технологии ЭИД+ГС – возможность реализации тонких минералогических исследований даже на единичных мелких зернах МПГ в породах и рудах.

Изучение потенциально алмазоносных пород.

Одним из важных требований к технологии минералогических исследований потенциально алмазоносных пород при их дезинтеграции является

возможность сохранения кристаллов алмаза в продукте дробления*. Ранее [9, 39], на примерах алмазоносных метаморфических пород Кумдыкольского месторождения, Северный Казахстан [4], и попигайских импактитов, Сибирь [3], нами была показана идеальная сохранность микрокристаллов алмаза в продуктах ЭИД этих пород (рис. 8, а, б). Особо выделим сохранность даже разбитой трещинами псевдоморфозы алмаза по графиту из импактита (рис. 8, б). ЭИД+ГС – оптимальная технология для получения и отбора статистически представительной полной выборки комплекса зерен минералов-спутников алмаза из «тяжелых» ГС-концентратов кимберлитов и лампроитов крупностью 0,25–0,5 мм (рис. 8). Дальнейшие исследования химического состава этих минералов на микрозонде и сопоставление с известными базами данных для минералов-спутников [18, 33] позволяют надежно оценить потенциальную алмазоносность изученных объектов [2].

Технология ЭИД+ГС использована нами, например, для изучения лампроитов Карелии. В восточной части Фенноскандинавского щита в 60–70-е годы XX в. выявлена Фенно-Карельская алмазоносная провинция. В Костомукшском рудном районе установлено более 120 даек и диатрем лампроитов. В пределах Костомукшского железорудного месторождения В. Я. Горьковцом в 2005 г. откартирована диатрема лампроитов диаметром 200–250 м (площадь сечения 3 га). Трубка прорывает породы архейских железорудных метаморфизованных толщ гимольской серии (изотопный возраст 2,8 млрд лет). Трубка сложена мелко- и среднеобломочными брекчиями. Брекчии состоят из обломков сильно измененных гипербазитов и вмещающих лопийских пород, сцементированных существенно флогопитовой породой. Среди включений резко преобладают ксенолиты ультраосновных пород (50–60 %).

Проведены 3D-минералогическое исследование двух дайковых тел лампроитов, лампроитовой брекчии и лампроитов диатремы [2]. По химическому составу и минералогическим данным породы диатремы определены как сильно измененные оливинные лампроиты, содержащие

* Задача обнаружения алмаза не является приоритетной, поскольку минералогические работы проводятся на малых объемах продукта дробления образца.

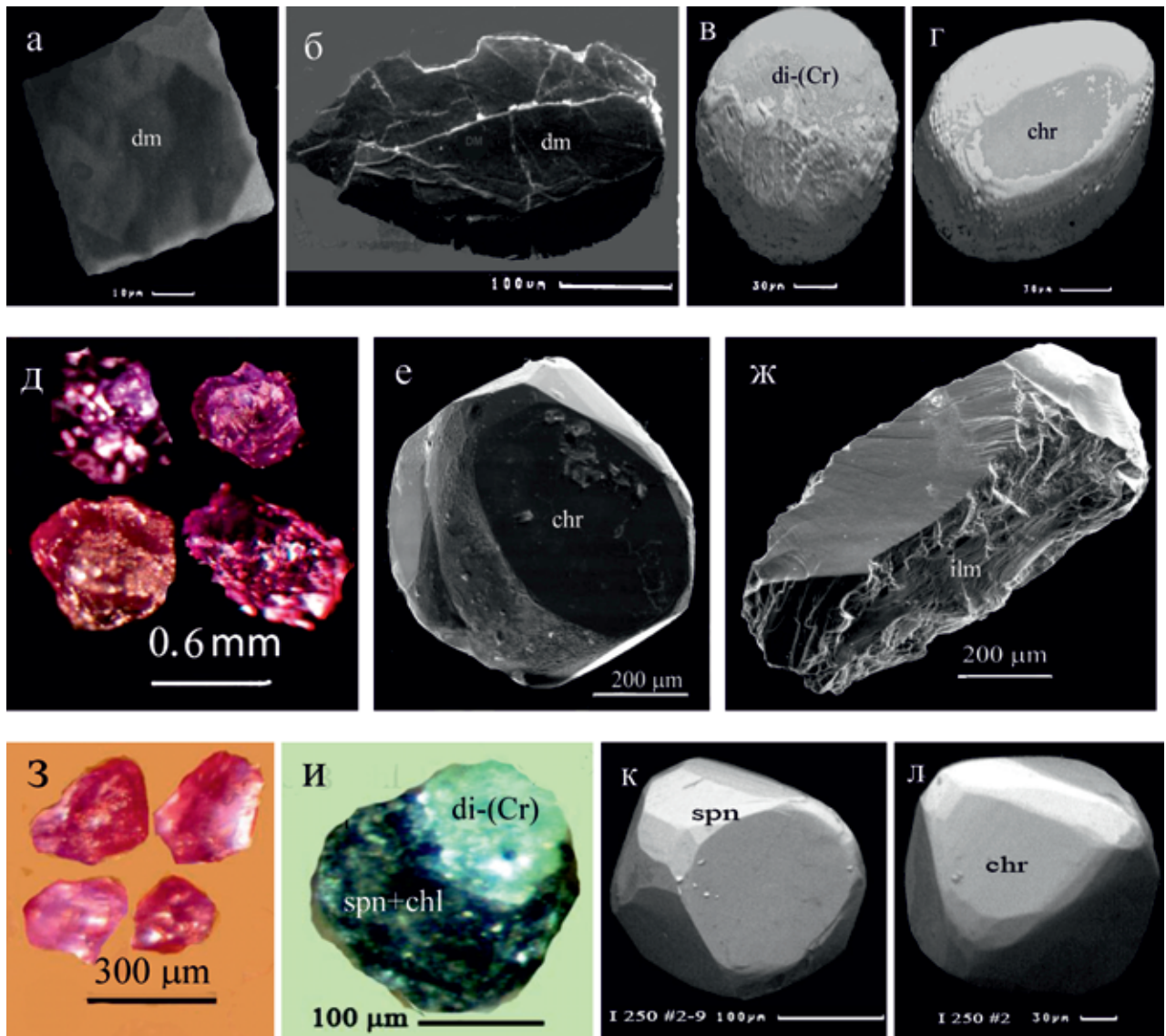


Рис. 8. Зерна алмаза (*a* – Кумдыкольское и *б* – Попигойское месторождения) и минералов-спутников алмаза из кимберлитов (*в*, *г* – кимберлитовая трубка Ломоносовская, Архангельская область, *д*, *ж* – кимберлитовая трубка Манчары, Якутия) и лампроитов (*з–л* – лампроитовая диатрема, Карелия, Костомукшский район), извлеченные из пород с использованием ЭИД+ГС

a–г, *е*, *ж*, *к*, *л* – SEM BSE-фото (*a–г*, *к*, *л* – Camscan-4DV; *е*, *ж* – Camscan MX-2500); оптические микрофотообъемные зерна, стереомикроскоп MZ6, камера Leica DC300.

dm – алмаз, di-(Cr) – «хромдиопсид», chr – хромит, ilm – «пикроильменит», spn – шпинель, chl – хлорит, *д*, *з* – пироп

большой объем (50–60 %) ксенолитов, измененных шпинелевых (гранатовых) лерцолитов и гарцбургит-дунитов. Выделено 10 кристаллов алмаза размерами 1–1,5 мм (методом растворения сопутствующих минералов в кислотах из пробы весом 51 кг в лаборатории Де Бирс, г. Йоханнесбург). Из «тяжелых» концентратов лампроитов крупностью 100–500 мкм выделен широкий комплекс ксенокristов минералов-спутников алмаза (рис. 8, *з–л*): субкальциевый ($\text{CaO}_{\text{ср}}$ 2,6 мас. %) хромистый ($\text{Cr}_2\text{O}_{3\text{ср}}$ 5,3 мас. %) пироп (50 зерен); диопсид-Cr (7 мол. % космохлорового и 8 мол. % жадеитового компонентов – >40 зерен); высокохромистый хромит (Cr_2O_3 >62 мас. %); «пикроильменит» (MgO 11,7–13,8 мас. %). Ксенокristы алмаза и минералов-спутников указывают на глубокий (уровень гранатовых лерцолитов) источник магматического очага лампроитов и алмазоносность изученной

диатремы в Костомукшском рудном районе. 3D-минералогическая технология исследования позволяет реконструировать минеральные парагенезисы, в том числе и наиболее ранние мантийные, и однозначно определить породы диатремы как алмазоносные лампроиты.

Микрообъекты для геохронологического анализа. ЭИД+ГС гарантирует для различных пород и руд оптимальное извлечение из них в «тяжелые» концентраты микрообъектов (крупностью десятки – сотни микрометров) минералов для их геохронологического анализа (циркон, бадделейт, апатит, рутил, Os-минералы и др.). Эти объекты представлены зернами обычно простой изометричной формы (или кристаллами), так что при ЭИД (по границам зерен) часто формируют свободные индивиды [9, 39] (рис. 9); они, как правило, более «тяжелые»,

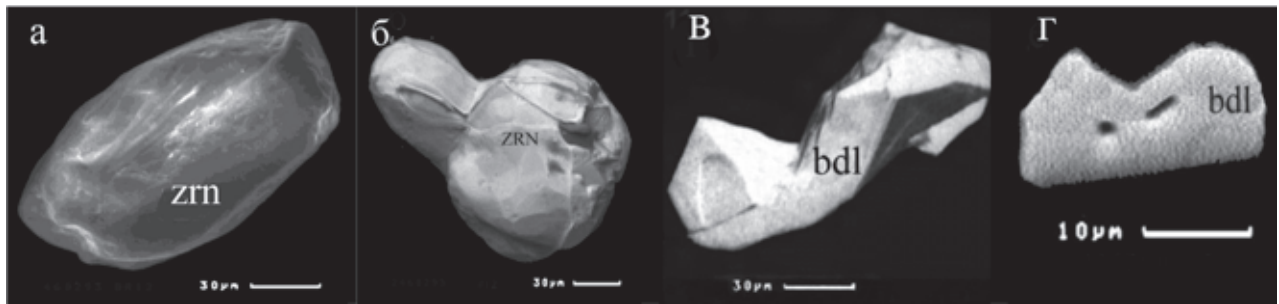


Рис. 9. Кристаллы циркона (zrn) и бадделеита (bdl) из различных пород и руд, извлеченные с использованием ЭИД+ГС для геохронологических измерений

а, б – кристаллы циркона из древних дунитов, Юго-Западная Гренландия; *в* – кристалл бадделеита из ксенолитов ультраосновных пород алмазоносной кимберлитовой трубки Ломоносовская, Архангельская область; *г* – мелкий кристалл бадделеита в полированном шлифе «тяжелого» обогащенного МПГ ГС-концентрата, Скаергаардский массив, Гренландия; Camscan-4DV. Изображения в поглощенных (*а, б*) и обратнорассеянных (*в, г*) электронах

чем сопровождающие их породообразующие минералы, поэтому интенсивно накапливаются в малом объеме ГС-концентрата.

Технология ЭИД+ГС использована нами, например, для извлечения цирконов с целью определения U-Pb-геохронологии гранатовых амфиболитов п-ова Камчатский мыс, Восточная Камчатка [5].

Ключевая информация о мантийном происхождении офиолитовых массивов и связанной с ними ЭПГ акцессорной минерализации подтверждается изотопно-геохимическими данными для Re-Os-системы акцессорных МПГ пород этих массивов. Исследования россыпная платиноидная минерализация, связанная с Усть-Бельским мафит-ультрамафитовым массивом (Корякское нагорье), и несколько зерен самородного осмия (размерами 0,3–0,1 мм), извлеченных из хромититов этого массива [11]. Модельные Re-Os-датировки ЭПГ минерализации и вмещающих ее ультрамафитов, определенные с использованием величины отношений $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$, соответствуют модельным возрастам 2200 ± 310 млн лет [11]. Нижняя граница этого интервала оказывается кардинально более древней, чем K-Ar возраст Усть-Бельского массива (210–380 млн лет) [6]. Следовательно, процесс формирования и эволюции акцессорной платиноидной минерализации ультрамафитов происходил преимущественно в верхней мантии и носил полициклический характер на протяжении длительного геологического времени.

На примере осадочных пород, богатых сульфидизированными микрофоссилиями (microfossil molds), Северная Дакота, США, показано идеальное высвобождение методом ЭИД сотен таких частиц в продукте дробления [42]. Эти микрофоссилии позволяют надежно датировать содержащие их осадочные породы.

Базы данных, полученные по рассмотренной 3D-минералогической технологии, обеспечивают возможность анализа фундаментальных вопросов рудообразования и обоснования связанного с ними оптимального выбора технологических тестов обогащения и переработки исследуемых руд.

Авторы искренне признательны И. В. Векслеру за предоставленный образец хромититов из Бушвельдского массива, а также за полезное и творческое обсуждение результатов исследования бушвельдских руд.

1. Бураков Б.Е., Костоянов А.И., Рудашевский Н.С. и др. Электроимпульсная дезинтеграция проб для изотопно-геохронологических и геохронологических исследований // Сов. геология. 1992. № 1. – С. 94–95.

2. Горьковец В.Я., Рудашевский Н.С., Рудашевский В.Н. и др. Алмазоносная диатрема лампроитов (Костомухский рудный район, Западная Карелия) // Регион. геология и металлогения. 2012. № 51. – С. 79–90.

3. Масайтис В.Л., Мацак М.С., Райхлин А.И. и др. Алмазоносные импактиты Попгайской астроблемы. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1998. – 178 с.

4. Минерально-сырьевые ресурсы Северо-Казахстанской области. – Кустанай, 2002. – 234 с.

5. Осипенко А.Б., Сидоров Е.Г., Шевченко С.С. и др. Геохимия и U-Pb геохронология цирконов из гранатовых амфиболитов п-ова Камчатский мыс (Восточная Камчатка) // Геохимия. 2007. № 3. – С. 1–9.

6. Пинус Г.В., Белинский В.В., Леснов Ф.П. и др. Альпинотипные гипербазиты Анадырско-Корякской складчатой системы. – Новосибирск: Наука, 1973. – 320 с.

7. Рудашевский Н.С. Происхождение различных типов платиноидной минерализации в породах ультрамафитовых формаций // Записки ВМО. 1987. Ч. 116. Вып. 2. – С. 222–238.

8. Рудашевский Н.С., Булах А.Г., Краснова Н.И. и др. Минералы платины, палладия, золота и серебра в карбонатитовых рудах месторождения Люлекоп (массив Палабора, ЮАР) // Записки ВМО. 2001. Вып. 5. – С. 21–35.

9. Рудашевский Н.С., Бураков Б.Е., Лупал С.Д. и др. Высвобождение и концентрирование акцессорных минералов посредством электроимпульсной дезинтеграции – эффективный метод технологической минералогии // Записки ВМО. 1991. Вып. 1. – С. 72–81.

10. Рудашевский Н.С., Кнауф В.В., Краснова Н.И., Рудашевский В.Н. Платинометаллическая и золото-серебряная минерализация в рудах и карбонатитах щелочно-ультраосновного комплекса (Ковдорский массив, Россия) // Записки ВМО. 1995. Вып. 5. – С. 1–15.

11. Рудашевский Н.С., Костоянов А.И., Рудашевский В.Н. Минералогические и изотопные свидетельства происхождения массивов альпинотипной формации (на примере Усть-Бельского массива, Корякское нагорье) // Записки ВМО. 1999. Вып. 4. – С. 11–28.

12. Рудашевский Н.С., Лупал С.Д., Рудашевский В.Н. Гидравлический классификатор. Патент на изобретение № 216530. Российская Федерация. 2001.

13. Рудашевский Н.С., Рудашевский В.Н. Гидравлический классификатор. Патент на изобретение № 2281808. Российская Федерация. 2006.

14. Рудашевский Н.С., Рудашевский В.Н. Гидравлический классификатор. Патент на изобретение № 69418, полезная модель. Российская Федерация. 2007.

15. Рудаевский В.Н., Рудаевский Н.С. Минералогия золота // Записки ВМО. 2017. Вып. 1. — С. 125–147.
16. Рудаевский Н.С., Рудаевский В.Н., Нюелсен Т.Д.Ф. Интерметаллиды и сплавы меди и палладия в золото-палладиевых рудах Скаергаардского массива (Гренландия) // Записки РМО. 2014. Вып. 1. — С. 30–53.
17. Рудаевский Н.С., Рудаевский В.Н., Нюелсен Т.Д.Ф., Шебанов А.Д. Сплавы и интерметаллиды золота и меди в золото-палладиевых рудах Скаергаардского массива (Гренландия) // Записки РМО. 2014. Вып. 4. — С. 1–23.
18. Соболев Н.В. Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. — Новосибирск: Наука, 1974. — 262 с. (Тр. Ин-та геологии и геофизики СО РАН СССР. Вып. 183).
19. Томов Т.К. Обогащение руд в тяжелых жидкостях. — М.: Недра, 1968. — 167 с.
20. Финкельштейн Г.А., Курец В.И., Цукерман В.А., Изюмко В.М. Избирательность электроимпульсной дезинтеграции // Обогащение руд. 1989. Т. 204. № 4. — С. 36–38.
21. Шохин В.Н., Лопатин А.Г. Гравитационные методы обогащения. — М.: Наука, 1980. — 400 с.
22. Юткин Л.А., Гольцова Л. Способ получения высоких и сверхвысоких давлений. Авторское свидетельство № 105011 (СССР). Заявл. 15.04.50, № 416898. Опубликовано в БИ. 1957. № 41.
23. Andersen J.C.Ø., Rasmussen H., Nielsen T.F.D., Rønso J.C. The Triple Group and the Platinovald gold and palladium reefs in the Skaergaard intrusion: Stratigraphic and petrographic relations // Econ. Geol. 1998. Vol. 93. — P. 488–509.
24. Campbell I.H., Naldrett A.J., Barnes S.J. A model for the origin of the platinum-rich sulphide horizons in the Bushveld and Stillwater Complexes // J. of Petrology. 1983. Vol. 24. — P. 133–165.
25. Godel B., Rudashevsky N.S., Nielsen T.F.D. et al. New constraints on the origin of the Skaergaard intrusion Cu-Pd-Au mineralization: Insights from high-resolution X-ray computed tomography // Lithos. 2014. 190–191. — P. 27–36.
26. Holwell D.A., Keats R. R., McDonald I., William M. R. Super-concentration of PGE, Au, Se, and Te by sulphide liquid dissolution in closed systems: Evidence from the Skaergaard intrusion, East Greenland // Acta Geologica Sinica (English edition). 2014. Vol. 88. Suppl. 2. — P. 283–284.
27. Junge M., Oberthür T., Melche F. Chromite chemistry, platinum group element and platinum group mineral distribution in the UG2 chromitite: an example from the Karee mine, Western Bushveld Complex, South Africa // Econ. Geol. 2014. Vol. 109. — P. 795–810.
28. Lastra R., Pric J., Cabri L.J. et al. Gold characterization of a sample from Malartic East (Québec) using concentration by hydroseparator // Proc. International Symposium on the Treatment of Gold Ores, Calgary, Alberta / Eds. by G. Deschênes, D. Houdin, L. Lorenzen. 2005. — P. 17–29.
29. Maier W.D. Platinum group element (PGE) deposits and occurrences: mineralization styles, genetic concepts, and exploration criteria // J. of African Earth Sci. 2005. Vol. 41. — P. 165–191.
30. Maier W.D., Barnes S.-J., Groves D.I. The Bushveld Complex, South Africa: formation of platinum-palladium, chrome- and vanadium-rich layers via hydrodynamic sorting of a mobilized cumulate slurry in a large, relatively slowly cooling, subsiding magma chamber // Miner. Deposita. 2013. Vol. 48. — P. 1–56.
31. McBirney A.R. The Skaergaard Intrusion / R.G. Cawthorn (Ed.) // Layered Intrusions. Elsevier, 1996. — P. 147–180.
32. McClenaghan M.B. Overview of common processing methods for recovery of indicator minerals from sediment and bedrock in mineral exploration // Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis. — 2011. Vol. 11. — P. 265–278.
33. Mitchell R.H., Bergman S.C. Petrology of lamproites. — New York, Plenum Publishing Corporation, 1991. — 447 p.
34. Naldrett A.J., Wilson A., Kinnaird J., Yudovskaya M., Chunnett G. The origin of chromites and related PGE mineralization in the Bushveld Complex: New mineralogical and petrological constraints // Miner. Deposita. 2012. Vol. 47. — P. 209–232.
35. Nielsen T.F.D. Platinum, palladium, and gold in the Layered Series of the Skaergaard intrusion / GEUS Report. 2004. Vol. 47. — 39 p.
36. Nielsen T.F.D., Andersen J.C.Ø., Holness M.B. et al. The Skaergaard PGE and gold deposit: the result of *in situ* fractionation sulphide saturation, and magma chamber-scale precious metal redistribution by immiscible Fe-rich melt // J. of Petrology. 2015. Vol. 56. No 8. — P. 1643–1676.
37. Oberthür T., Junge M., Rudashevsky N. et al. Platinum group minerals in the LG and MG chromitites of the eastern Bushveld Complex, South Africa // Miner. Deposita. 2016. Vol. 51. — P. 71–87.
38. Osbahr I., Klemd R., Oberthür T. et al. Platinum group element distribution in base-metal sulphides of the Merensky Reef from the eastern and western Bushveld Complex, South Africa // Miner. Deposita. 2013. Vol. 48. Iss. 2. — P. 211–232.
39. Rudashevsky N.S., Burakov B.E., Lupal S.D. Liberation of accessory minerals from various rock types by electric pulse disintegration — method and application. — Transactions, Institution of Mining and Metallurgy, 1995. Vol. 104. — P. 25–29.
40. Rudashevsky N.S., Kretser Yu.L., Rudashevsky V.N., Sukharzhhevskaya E.A. A review and comparison of PGE, noble-metal and sulphide mineralization in phoscorites and carbonatites from Kovdor and Phalaborwa // Phoscorites and carbonatites from mantle to mine: the key example of the Kola Alkaline Province / Eds. by F. Walls and A.N. Zaitsev. — London: Published by the Mineralogical Soc. of Great Britain and Ireland, 2004. — 375–406 p.
41. Rudashevsky N.S., Rudashevsky V.N., Lupal S.D. Method for separating granular materials and device for carrying out said method // Patent Cooperation Treaty PCT/RU01/00123, Moscow, 20 April 2001, 10 May 2001. (Russian and English text).
42. Saini-Eidukat B., Weiblen P.W. A new method of fossil preparation using high-voltage electric pulses // Curator. 1996. Vol. 39. No 2. — P. 139–144.
43. Verwoerd W.J. Mineral deposits associated with carbonatites and alkaline rocks // Mineral Deposits of Southern Africa / Eds. by C.R. Anhaeusser and S. Maske. — Geol. Soc. of South Africa. — 1986. Vol. 2. Pretoria, South Africa. — P. 2173–2191.
44. Von Gruenewaldt G. The mineral resources of the Bushveld Complex // Miner. Sci. Eng. — 1977. Vol. 9(2). — P. 83–95.
45. Wilson A.H. Distribution and control of platinum group element and base metal mineralisation in the Darwendale sub-chamber of the Great Dyke, Zimbabwe / Eds. by A.H. Wilson, A.J. Naldrett, M. Tredoux // Geology. — 1989. Vol. 17. — P. 649–652.

-
1. Burakov B.E., Kostoyanov A.I., Rudashevskij N.S. et al. Electropulse disintegration of samples for isotope-geochronological and geochronological studies et al. *Sov. Geologiya*. 1992. No 1, pp. 94–95. (In Russian).
2. Gor'kovec V.Ya., Rudashevskij N.S., Rudashevskij V.N. et al. Diamond-bearing diatreme lamproite (Kostomuksha ore region, West Karelia). *Region. geologiya i metallogeniya*. 2012. No 51, pp. 79–90. (In Russian).
3. Masajtis V.L., Mashchak M.S., Rajhlin A.I. et al. Almazonosnye impaktity Popigajskoj astroblemy [Diamond impactites of the Popigay astrobleme]. St. Petersburg: VSEGEI. 1998. 178 p.
4. Mineral'no-syr'evye resursy Severo-Kazahstanskoy oblasti [Mineral resources of the North-Kazakhstan region]. Kustanaj. 2002. 234 p.
5. Osipenko A.B., Sidorov E.G., Shevchenko S.S. et al. Geochemistry and U-Pb geochronology of zircons from pomegranate amphibolites of Kamchatka cape (Eastern Kamchatka). *Geohimiya*. 2007. No 3, pp. 1–9. (In Russian).
6. Pinus G.V., Belinskij V.V., Lesnov F.P. et al. Al'pinotipnye giperbazity Anadyrsko-Koryakskoj skladchatoy sistemy [Alpinotype hyperbasites of the Anadyr-Koryak fold system]. Novosibirsk: Nauka. 1973. 320 p.
7. Rudashevskij N.S. The origin of various types of platinum mineralization in rocks of ultramafic formations. *Notes*

- of the *All-Union Mineralogical Society*. 1987. Pt. 116. Iss. 2, pp. 222–238. (In Russian).
8. Rudashevskij N.S., Bulah A.G., Krasnova N.I. et al. Minerals of platinum, palladium, gold and silver in the carbonatite ores of the Lyulek deposit (the Palabora massif, South Africa). *Notes of the All-Union Mineralogical Society*. 2001. Iss. 5, pp. 21–35. (In Russian).
 9. Rudashevskij N.S., Burakov B.E., Lupal S.D. et al. The liberation and concentration of accessory minerals by means of electropulse disintegration is an effective method of technological mineralogy. *Notes of the All-Union Mineralogical Society*. 1991. Iss. 1, pp. 72–81. (In Russian).
 10. Rudashevskij N.S., Knauf V.V., Krasnova N.I., Rudashevskij V.N. Platinum-metal and gold-silver mineralization in ores and carbonatites of the alkali-ultrabasic complex (Kovdorsky Massif, Russia). *Notes of the All-Union Mineralogical Society*. 1995. Iss. 5, pp. 1–15. (In Russian).
 11. Rudashevskij N.S., Kostoyanov A.I., Rudashevskij V.N. Mineralogical and isotope evidence of the origin of the alpine-type formation massifs (on the example of the Ust-Belsky Massif, Koryak Upland). *Notes of the All-Union Mineralogical Society*. 1999. Iss. 4, pp. 11–28. (In Russian).
 12. Rudashevskij N.S., Lupal S.D., Rudashevskij V.N. Gidravlicheskiy klassifikator. Patent na izobretenie No 216530. Rossijskaya Federaciya [Hydraulic classifier. Patent for invention No 216530. Russian Federation]. 2001.
 13. Rudashevskij N.S., Rudashevskij V.N. Gidravlicheskiy klassifikator. Patent na izobretenie No 2281808. Rossijskaya Federaciya [Hydraulic classifier. Patent for invention No 2281808. Russian Federation]. 2006.
 14. Rudashevskij N.S., Rudashevskij V.N. Gidravlicheskiy klassifikator. Patent na izobretenie No 69418, poleznaya model'. Rossijskaya Federaciya [Hydraulic classifier. Patent for invention No 69418, utility model. Russian Federation]. 2007.
 15. Rudashevskij V.N., Rudashevskij N.S. Mineralogy of gold. *Notes of the All-Union Mineralogical Society*. 2017. Iss. 1, pp. 125–147. (In Russian).
 16. Rudashevskij N.S., Rudashevskij V.N., Nielsen T.D.F. Intermetallidy i splavy medi i palladiya v zoloto-palladiyevykh rudakh Skaergaardskogo massiva (Grenlandiya). *Notes of the All-Union Mineralogical Society*. 2014. Iss. 1, pp. 30–53. (In Russian).
 17. Rudashevskij N.S., Rudashevskij V.N., Nielsen T.D.F., Shebanov A.D. Alloys and intermetallics of gold and copper in the gold-palladium ores of the Skaergaard Massif (Greenland). *Notes of the All-Union Mineralogical Society*. 2014. Iss. 4, pp. 1–23. (In Russian).
 18. Sobolev N.V. Glubinnye vkluyucheniya v kimberlitah i problema sostava verhnej mantii [Deep inclusions in kimberlites and the problem of the composition of the upper mantle]. Novosibirsk: Nauka. 1974. 262 p. (Tr. In-ta geologii i geofiziki SO RAN SSSR. Iss. 183).
 19. Tomov T.K. Obogashchenie rud v tyazhelykh zhidkostyakh [Enrichment of ores in heavy liquids]. Moscow: Nedra. 1968. 167 p.
 20. Finkel'shtejn G.A., Kurec V.I., Cukerman V.A., Izoitko V.M. Selectivity of electropulse disintegration. *Enrichment of ores*. 1989. Vol. 204. No 4, pp. 36–38. (In Russian).
 21. Shohin V.N., Lopatin A.G. Gravitacionnye metody obogashcheniya [Gravitational enrichment methods]. Moscow: Nauka. 1980. 400 p.
 22. Yutkin L.A., Gol'cova L. Sposob polucheniya vysokikh i sverhvisokikh davlenij. Avtorskoe svidetel'stvo No 105011 (SSSR) [Method for obtaining high and ultrahigh pressures. Author's certificate No. 105011 (USSR)] Zayavl. 15.04.50, No 416898. Opublikovano v BI. 1957. No 41.
 23. Andersen, J.C.Ø., Rasmussen, H., Nielsen, T.F.D., Rønnebo, J.C. 1998: The Triple Group and the Platinova gold and palladium reefs in the Skaergaard intrusion: Stratigraphic and petrographic relations. *Econ. Geol.* Vol. 93. 488–509.
 24. Campbell, I.H., Naldrett, A.J., Barnes, S.J. 1983: A model for the origin of the platinum-rich sulphide horizons in the Bushveld and Stillwater Complexes. *J. of Petrology*. Vol. 24. 133–165.
 25. Godel, B., Rudashevsky, N.S., Nielsen, T.F.D. et al. 2014: New constraints on the origin of the Skaergaard intrusion Cu-Pd-Au mineralization: Insights from high-resolution X-ray computed tomography. *Lithos*. 190–191. 27–36.
 26. Holwell, D.A., Keats, R.R., McDonal, I., William, M.R. 2014: Super-concentration of PGE, Au, Se, and Te by sulphide liquid dissolution in closed systems: Evidence from the Skaergaard intrusion, East Greenland. *Acta Geologica Sinica (English edition)*. Vol. 88. 2. 83–284.
 27. Junge, M., Oberthür, T., Melche, F. 2014: Chromite chemistry, platinum group element and platinum group mineral distribution in the UG2 chromitite: an example from the Karee mine, Western Bushveld Complex, South Africa. *Econ. Geol.* Vol. 109. 795–810.
 28. Lastra, R. Pric, J., Cabri, L.J. et al. 2005: Gold characterization of a sample from Malartic East (Québec) using concentration by hydroseparator. In Deschênes, G., Houdin, D., Lorenzen, L. (eds.): *Proc. International Symposium on the Treatment of Gold Ore, Calgary, Alberta*. 17–29.
 29. Maier, W.D. 2005: Platinum group element (PGE) deposits and occurrences: mineralization styles, genetic concepts, and exploration criteria. *J. of African Earth Sci.* Vol. 41. 165–191.
 30. Maier, W.D., Barnes, S.-J., Groves, D.I. 2013: The Bushveld Complex, South Africa: formation of platinum–palladium, chrome- and vanadium-rich layers via hydrodynamic sorting of a mobilized cumulate slurry in a large, relatively slowly cooling, subsiding magma chamber. *Miner. Deposita*. Vol. 48. 1–56.
 31. McBirney, A.R. 1996: The Skaergaard Intrusion. In Cawthorn, R.G. (ed.): *Layered Intrusions*. Elsevier. 147–180.
 32. McClenaghan, M.B., 2011: Overview of common processing methods for recovery of indicator minerals from sediment and bedrock in mineral exploration. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. Vol. 11. 265–278.
 33. Mitchell, R.H., Bergman, S.C. 1991: Petrology of lamproites. New York Plenum Publishing Corporation. 447.
 34. Naldrett, A.J., Wilson, A., Kinnaird, J., Yudovskaya, M., Chunnnett, G. 2012: The origin of chromites and related PGE mineralization in the Bushveld Complex: New mineralogical and petrological constraints. *Miner. Deposita*. Vol. 47. 209–232.
 35. Nielsen, T.F.D. 2004: Platinum, palladium, and gold in the Layered Series of the Skaergaard intrusion. *GEUS Report*. Vol. 47. 39.
 36. Nielsen, T.F.D., Andersen, J.C.Ø., Holness, M.B. et al. 2015: The Skaergaard PGE and gold deposit: the result of *in situ* fractionation sulphide saturation, and magma chamber-scale precious metal redistribution by immiscible Fe-rich melt. *J. of Petrology*. Vol. 56. 8. 1643–1676.
 37. Oberthür, T., Junge, M., Rudashevsky, N. et al. 2016: Platinum group minerals in the LG and MG chromitites of the eastern Bushveld Complex, South Africa. *Miner. Deposita*. Vol. 51. 71–87.
 38. Osbahr, I., Klemd, R., Oberthür, T. et al. 2013: Platinum group element distribution in base-metal sulphides of the Merensky Reef from the eastern and western Bushveld Complex, South Africa. *Miner. Deposita*. Vol. 48. 2. 211–232.
 39. Rudashevsky, N.S., Burakov, B.E., Lupal, S.D. 1995: Liberation of accessory minerals from various rock types by electric pulse disintegration – method and application. *Transactions, Institution of Mining and Metallurgy*. Vol. 104. 25–29.
 40. Rudashevsky, N.S., Kretser, Yu.L., Rudashevsky, V.N., Sukharzhevskaya E.A. 2004: A review and comparison of PGE, noble-metal and sulphide mineralization in phoscorites and carbonatites from Kovdor and Phalaborwa. In Walls, F. and Zaitsev, A.N. (eds.): *Phoscorites and carbonatites from Mantle to Mine: the Key Example of the Kola Alkaline Province*. Published by the Mineralogical Soc. of Great Britain and Ireland, London. 375–406.
 41. Rudashevsky, N.S., Rudashevsky, V.N., Lupal, S.D. 2001: Method for separating granular materials and device for carrying out said method. *Patent Cooperation Treaty PCT/RU01/00123, Moscow, 20 April, 10 May 2001. (Russian and English text)*.
 42. Saini-Eidukat, B., Weiblen, P.W. 1996: A new method of fossil preparation using high-voltage electric pulses. *Curator*. Vol. 39. 2. 139–144.

43. Verwoerd, W.J. 1986: Mineral deposits associated with carbonatites and alkaline rocks. In Anhaeusser C.R. and Maske, S. (eds.): *Mineral Deposits of Southern Africa Geol. Soc. of South Africa. 2. Pretoria, South Africa.* 2173–2191

44. Von Gruenewaldt, G. 1977: The mineral resources of the Bushveld Complex. *Miner. Sci. Eng.* 9(2). 83–95.

45. Wilson, A.H., 1989: Distribution and control of platinum group element and base metal mineralisation in the Darwendale sub-chamber of the Great Dyke, Zimbabwe. In Wilson, A.H., Naldrett, A.J., Tredoux, M. (eds.): *Geology. Vol. 17.* 649–652.

Рудашевский Николай Семенович – доктор геол.-минер. наук, соучредитель, ООО «РС+». Набережная р. Смоленки, 33а, Санкт-Петербург, 199155, Россия. <nrudash@list.ru>

Рудашевский Владимир Николаевич – канд. геол.-минер. наук, соучредитель, ООО «РС+». Набережная р. Смоленки, 33а, Санкт-Петербург, 199155, Россия.

Антонов Антон Владимирович – зав. сектором, Центр изотопных исследований Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского (ЦИИ ВСЕГЕИ). Средний пр., 74, Санкт-Петербург, 199106, Россия.

Rudashevsky Nikolaj Semenovich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, co-founder, Limited Liability Company «РС+». 33a Naberezhnaya reki Smolenki, St. Petersburg, 199155, Russia. <nrudash@list.ru>

Rudashevsky Vladimir Nikolaevich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, co-founder, Limited Liability Company «РС+». 33a Naberezhnaya reki Smolenki, St. Petersburg, 199155, Russia.

Antonov Anton Vladimirovich – Head of Sector, A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). 74 Sredny Prospekt, St. Petersburg, 199106, Russia.